



DEUTSCHES  
PATENTAMT

21 Aktenzeichen: P 44 35 832.6  
22 Anmeldetag: 7. 10. 94  
43 Offenlegungstag: 11. 4. 96

DE 44 35 832 A 1

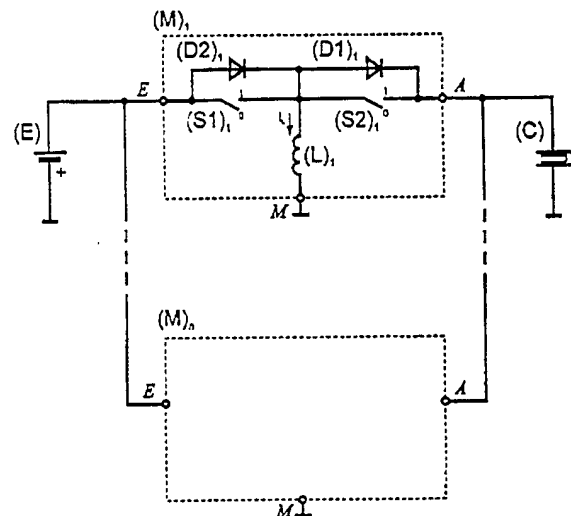
71 Anmelder:  
Technische Universität Dresden, 01069 Dresden, DE

72 Erfinder:  
Vetter, Tobias, Dipl.-Ing., 01257 Dresden, DE; Pippig,  
Uwe, 08209 Rebesgrün, DE

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

54 Schaltungsanordnung zur schnellen und verlustfreien Ladung und Entladung kapazitiver Lasten

57 Die Erfindung betrifft eine Schaltungsanordnung zum schnellen Auf- und Entladen kapazitiver Lasten, bei der ein verlustfreier Energietransport zwischen dem Energiespeicher und der Last erfolgt, insbesondere zur Erzeugung eines mechanischen Hubes an Piezoaktoren. Ein aufladbarer Energiespeicher (E) ist durch Reihenschaltung der Diode (D1<sub>x</sub>) und der Diode (D2<sub>x</sub>) mit der kapazitiven Last (C) verbunden, eine Induktivität (L<sub>x</sub>) mit der Anode von (D1<sub>x</sub>) und der Katode von (D2<sub>x</sub>), parallel zu (D1<sub>x</sub>) ist der Schalter (S2<sub>x</sub>) und zu (D2<sub>x</sub>) der Schalter (S1<sub>x</sub>) angeordnet, und das verbleibende Anschlußende von (E), (L<sub>x</sub>) und (C) liegt an einem gemeinsamen Bezugsknoten. Mit der Schaltungsanordnung lassen sich Auf- und Entladevorgänge von kapazitiven Lasten, insbesondere Hübe von Piezoaktoren, ohne schaltungsbedingte Energieverluste steuern.



DE 44 35 832 A 1

## Beschreibung

Die Erfindung betrifft eine Schaltungsanordnung zum schnellen Auf- und Entladen kapazitiver Lasten, bei der ein verlustfreier Energietransport zwischen dem Energiespeicher und der Last erfolgt, insbesondere zur Erzeugung eines mechanischen Hubes an Piezoaktoren.

Legt man eine elektrische Spannung an einen scheibenförmigen Piezokristall, so tritt aufgrund des reziproken piezoelektrischen Effektes eine Dickenänderung auf. Diese Eigenschaft ermöglicht den Bau von Piezoaktoren. Durch die mechanische Stapelung bei elektrischer Parallelschaltung dünner Piezokeramikscheiben bzw. -folien (Multilayertechnologie) lassen sich mechanische Hübe mit heutigen technologischen Mitteln von bis zu 200 µm bei einem angelegten Spannungshub von ca. 1 kV erreichen. Durch die elektrische Parallelschaltung vieler Keramikfolien steigt die elektrische Kapazität von Piezoaktoren auf bis zu 10 µF an. Diese Kapazität besitzt parasitäre Charakter, d. h. jede Spannungsänderung mit dem Ziel einer Längenänderung des Piezoaktors bewirkt einen hohen Stromfluß um die Kapazität auf- bzw. zu entladen. Das bedeutet, soll sich der Piezoaktor auf seine maximale Länge ausdehnen, muß sehr viel Energie in den Aktor hineinfließen, die in der Kapazität gespeichert wird, bis zu dem Moment, in dem sich der Piezoaktor wieder in seiner Länge verkürzen soll, dann ist es erforderlich, die in der Kapazität gespeicherte elektrische Energie durch Verringerung der angelegten Spannung dem Piezoaktor wieder zu entziehen.

Bei Anwendung von Piezoaktoren als kapazitive Last kann kein vollständiger Energierückfluß erfolgen, da ein Teil der Energie mit der Verrichtung mechanischer Arbeit und durch Eigenverluste des Piezoaktors an die Außenwelt abgegeben werden.

Bisherige Schaltungsanordnungen verwenden resistive Schaltungselemente, meist einen ohmschen Widerstand, der sich in Serienschaltung zwischen einer Spannungsquelle und der Kapazität durch Schließen eines Schalters befindet. Die über der Kapazität anliegende Spannung steigt in bekannter Weise exponentiell bis auf den Wert der Spannungsquelle an. Dabei wird über dem Widerstand eine Verlustleistung an die Umgebung, meist in Form von Wärme, abgegeben. Die abgegebene Wärmemenge besitzt die gleiche Energiemenge, wie die in der Kapazität enthaltene elektrische Energie, so daß nur 50% der von Spannungsquelle abgegebenen Energiemenge in der Kapazität am Ende des Ladevorganges enthalten ist. Zur Entladung wird durch Schließen des Schalters ein resistives Schaltungselement, z. B. der ohmsche Widerstand, mit der Kapazität parallelgeschaltet. Die über der Kapazität anliegende Spannung fällt dabei exponentiell bis auf Null Volt. Die zuvor in der Kapazität enthaltene Energie wird dabei vollständig durch die Verlustleistung des Widerstandes an die Umgebung abgegeben. Erfolgt das Auf- und Entladen der Kapazität mit einer hohen Frequenz, besteht eine sehr hohe Anforderung an die Spannungsquelle zur Leistungsabgabe, die letztendlich vollständig an die Umwelt, meist in Form von Wärme, abgegeben wird.

Die in DE 30 48 632 vorgestellte Lösung zeigt eine Möglichkeit, die ein Auf- und Entladen der Kapazität des Piezoaktors realisiert, indem die erforderliche Energie in einer zweiten Kapazität C' zwischengespeichert wird. Der Ladungstransport zwischen den Kapazitäten C und C' wird dabei von einer Spule L realisiert, so daß keine Energieverluste beim Betrieb des Piezoaktors auftreten. Nachteilig in dieser Anordnung ist jedoch die feste zeitliche Vorgabe, in der ein vollständiger Ladungsaustausch zwischen den Kapazitäten C und C' stattfindet, d. h. der Spannungsanstieg am Piezoaktor, und damit auch die Geschwindigkeit der Längenänderung ist durch die Dimensionierung der Induktivität L festgelegt. Der Einsatz erscheint dadurch nur für den stationären Betrieb sinnvoll, d. h. bei konstanter Schwingfrequenz eines Piezoaktors. Gravierendster Nachteil dieser Schaltungsanordnung ist, daß bei verlustfreiem Betrieb der am Piezoaktor anliegende Spannungshub immer wieder mit gleicher Amplitude erfolgen muß, da ein Auftrennen der Reihenschaltung von C, C' und L durch Öffnen von Schalter S2 erst erfolgen darf, wenn der Stromfluß wieder den Wert Null (nach einer Halbperiode T/2) erreicht hat (sonst hohe Induktionsspannungen über L).

$$\frac{T}{2} = \pi \cdot \sqrt{L \cdot (C \parallel C')} \quad (1)$$

Die Aufgabe der Erfindung bestand darin, eine Schaltungsanordnung anzugeben, die eine Ansteuerung kapazitiver Lasten, z. B. Piezoaktoren realisiert, ohne daß während des Auf- und Entladevorganges schaltungsbedingte Energieverluste auftreten, die zwischenzeitlich in der Kapazität C gespeicherte Energie vollständig in die Energiequelle E zurückgespeist wird und die Spannung an der Kapazität C während des Betriebes in Endwert und Anstiegsverhalten frei variierbar bleibt.

Erfindungsgemäß wird die Aufgabe dadurch gelöst, daß ein aufladbarer Energiespeicher durch Reihenschaltung einer ersten und einer zweiten Diode mit einer kapazitiven Last verbunden ist, eine Induktivität mit der Anode der ersten und der Katode der zweiten Diode verbunden ist. Parallel zu den Dioden ist je ein Schalter angeordnet. Die verbleibenden Anschlußenden des Energiespeichers, der Induktivität und der Kapazität liegen auf einem gemeinsamen Bezugspotential.

Die Schaltungsanordnung ermöglicht eine Ansteuerung von kapazitiven Lasten, die eine verlustfreie Aufladung sowie Entladung der Lastkapazität gewährleistet. Wird als Spannungsquelle ein aufladbarer Energiespeicher, z. B. Kondensator oder Akkumulator, verwendet, erfolgt bei Entladung von der Kapazität eine vollständige Energierückspeisung in die Spannungsquelle, d. h. es fließt Strom in die Spannungsquelle hinein.

Vorzugsweise werden die Schalter durch elektronische Schalter ausgebildet, die durch eine Ansteuerbaugruppe gesteuert werden.

Bei der Ausbildung der Schaltung mit mehreren Modulen gleicher Bauart, wird eine höhere Schaltleistung erreicht.

Die Schaltungsanordnung sowie deren Funktion wird nachstehend an einem Ausführungsbeispiel näher erläutert. In den Zeichnungen zeigt

Fig. 1 eine erfindungsgemäße Schaltungsanordnung,

Fig. 2 eine erfindungsgemäße Schaltungsanordnung mit n Moduln,

Fig. 3a einen Ansteueralgorithmus zur Aufladung des Piezoaktors mit n Moduln,

Fig. 3b einen Ansteueralgorithmus zur Entladung des Piezoaktors.

In Fig. 1 ist eine erfindungsgemäße Schaltungsanordnung dargestellt. Die wiederaufladbare Spannungsquelle E ist über den Modul M mit dem Piezoaktor C in Reihe geschaltet. Die verbleibenden Enden von E, M und C liegen an einem gemeinsamen Bezugspotential. Das gemeinsame Bezugspotential ist mit dem positiven Anschluß der wiederaufladbaren Spannungsquelle E verbunden.

Fig. 2 zeigt eine erfindungsgemäße Schaltungsanordnung mit  $n = 4$  Moduln. die Schalter  $S_{11}, S_{21}, \dots, S_{14}, S_{24}$  wurden in Form von MOS-Sperrschicht-Feldeffekttransistoren ausgeführt, deren Gatespannungen potentialgetrennt durch die Übertrager  $\bar{U}_{11}, \bar{U}_{21}, \dots, \bar{U}_{14}, \bar{U}_{24}$  vom Mikrocontroller  $\mu C$  bereitgestellt werden. Als Ansteueralgorithmus wurde ein Zeitregime, wie in Fig. 3a, 3b dargestellt, frei gewählt. Der sich ergebende Strom- und Spannungsverlauf an der Lastkapazität (Aktor) ist den Abbildungen in Fig. 3a und 3b zu entnehmen.

Die Erläuterung der Funktionsweise soll zuerst nur bei einstufiger Auslegung ( $n = 1$ ) der Schaltungsanordnung gemäß Fig. 1 erfolgen. Der Auf- und Entladevorgang der Lastkapazität erfolgt nach dem getakteten Prinzip, d. h. es erfolgt ein mehrfaches Öffnen und Schließen der Schalter  $S_1$  und  $S_2$  um die Spannung über C auf einen gewünschten Wert zu bringen.

#### Laden von C

Zur Aufladung von C sind die Bauelemente  $S_{11}, L_1, D_{11}$  relevant. Schalter  $S_{21}$  bleibt die gesamte Zeit der Aufladung geöffnet — Stellung 0.

[L1] Zum Zeitpunkt  $t_{2n}$  wird der Schalter  $S_{11}$  geschlossen — Stellung 1. Im Zeitraum von  $t_{2n}$  bis  $t_{2n+1}$  ( $n \in \mathbb{N}$ ) erfolgt ein Ansteigen des Stromes  $i_L$ , der durch die Spannungsquelle E gespeist wird. Die Spule  $L_1$  entnimmt der Spannungsquelle E die Energie.

$$\bar{W} = \frac{L}{2} (i_L^2(t_{2n+1}) - i_L^2(t_{2n})) \quad (2)$$

[L2] Zum Zeitpunkt  $t_{2n+1}$  wird der Schalter  $S_{11}$  geöffnet — Stellung 0. Die Diode  $D_{11}$  wird leitend, so daß die Spule  $L_1$  die Energie

$$\bar{W} = \frac{L}{2} (i_L^2(t_{2n+2}) - i_L^2(t_{2n+1})) - \frac{C}{2} (u_C^2(t_{2n+2}) - u_C^2(t_{2n+1})) \quad (3)$$

an die Kapazität C abgibt.

Soll die Spannung über der Kapazität C weiter erhöht werden, wird [L1], [L2] so oft wiederholt, bis die gewünschte Endspannung erreicht ist.

#### Entladen von C

Zur Entladung der Lastkapazität C sind die Bauelemente  $S_{21}, L_1, D_{21}$  relevant. Schalter  $S_{11}$  bleibt die gesamte Zeit der Entladung geöffnet — Stellung 0.

[E1] Die Spannung über C ist größer Null. Zum Zeitpunkt  $t_{2n}$  wird der Schalter  $S_{21}$  geschlossen — Stellung 1. Somit erfolgt im Zeitraum von  $t_{2n}$  bis  $t_{2n+1}$  ein Ansteigen des Stromes  $i_L$  in der Spule  $L_1$ . Die der Kapazität C entnommene Energie

$$\bar{W} = \frac{C}{2} (u_C^2(t_{2n+1}) - u_C^2(t_{2n})) - \frac{L}{2} (i_L^2(t_{2n+1}) - i_L^2(t_{2n})) \quad (4)$$

wird in der Spule L in Form eines Magnetflusses zwischengespeichert.

[E1] Zum Zeitpunkt  $t_{2n+1}$  wird der Schalter  $S_{21}$  geöffnet — Stellung 0. Die in der Spule gespeicherte magnetische Energie wird in die Spannungsquelle E gespeist, da die Diode  $D_{21}$  leitend wird. Die Menge der zurückgespeisten Energie beträgt

$$\bar{W} = \frac{L}{2} (i_L^2(t_{2n+2}) - i_L^2(t_{2n+1})) \quad (5)$$

Soll die Spannung über der Kapazität C weiter verringert werden, wird [E2] so oft wiederholt, bis die gewünschte Endspannung erreicht ist.

Die Schaltzeitpunkte für die Schalter  $S1_x$  und  $S2_x$  lassen sich durch freie Wahl des Ansteueralgorithmus, unter Berücksichtigung der Anzahl n parallelgeschalteter Module, als Werte festlegen oder durch geregelten Betrieb der Ansteuerschaltung variabel einstellen. Eine häufig angewendete Realisierung zur Ansteuerung der Schalter  $S1_1, S2_1 \dots S1_n, S2_n$  wird einen Mikrocontroller beinhalten, der zur Umsetzung des Ansteueralgorithmus programmiert ist.

Die momentane Ansteuerleistung eines Moduls  $M_x$  ist:

$$P_x = \frac{L_x}{2} \cdot \frac{i_{L_x}^2(t_{2n+1}) - i_{L_x}^2(t_{2n})}{t_{2n+2} - t_{2n}} \quad (6)$$

Durch die n-fach Kaskadierung der Module läßt sich die Gesamtansteuerleistung  $P_G$  wesentlich erhöhen:

$$P_G = \sum_{i=1}^n P_i \quad (7)$$

Dadurch lassen sich sehr hohe Anstiegsgeschwindigkeiten der am Piezoaktor anliegenden Spannung erreichen, unter Verwendung kleiner Spuleninduktivitäten  $L_x$  und einer geringen Strombelastung der Schalter  $S1_x, S2_x$ .

Bezugszeichenliste

- n Anzahl der verwendeten Moduln
- x Modulindex von 1 bis n
- C kapazitive Last / Piezoaktor
- 30  $D1_x$  Diode
- $D2_x$  Diode
- E Spannungsquelle / aufladbare Energiequelle
- $L_x$  Induktivität / Spule
- $M_x$  Modul / Schaltungsanordnung nach Patentanspruch 1
- 35  $S1_x$  Schalter
- $S2_x$  Schalter
- $T1_x$  MOS-Transistor
- $T2_x$  MOS-Transistor
- $\dot{U}1_x$  Übertrager 1:1
- 40  $\dot{U}2_x$  Übertrager 1:1

#### Patentansprüche

1. Schaltungsanordnung zur schnellen und verlustfreien Ladung und Entladung kapazitiver Lasten, dadurch gekennzeichnet, daß ein aufladbarer Energiespeicher (E) durch Reihenschaltung der Diode ( $D1_x$ ) und der Diode ( $D2_x$ ) mit der kapazitiven Last (C) verbunden ist, eine Induktivität ( $L_x$ ) mit der Anode von ( $D1_x$ ) und der Katode von ( $D2_x$ ) verbunden ist, parallel zu ( $D1_x$ ) der Schalter ( $S2_x$ ) und zu ( $D2_x$ ) der Schalter ( $S1_x$ ) angeordnet ist, und das verbleibende Anschlußende von (E), ( $L_x$ ) und (C) an einem gemeinsamen Bezugsknoten liegen.
2. Schaltungsanordnung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Schalter ( $S2_x$ ) und ( $S1_x$ ) elektronische Schalter sind, die durch eine Ansteuerbaugruppe geschaltet werden.
3. Schaltungsanordnung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß zu den durch die Dioden ( $D1_x$ ) und ( $D2_x$ ), der kapazitiven Last (C), den Schaltern ( $S2_x$ ) und ( $S1_x$ ) gebildeten Modul ( $M_x$ ) n Module mit gleicher Anordnung parallel geschaltet sind.

Hierzu 2 Seite(n) Zeichnungen

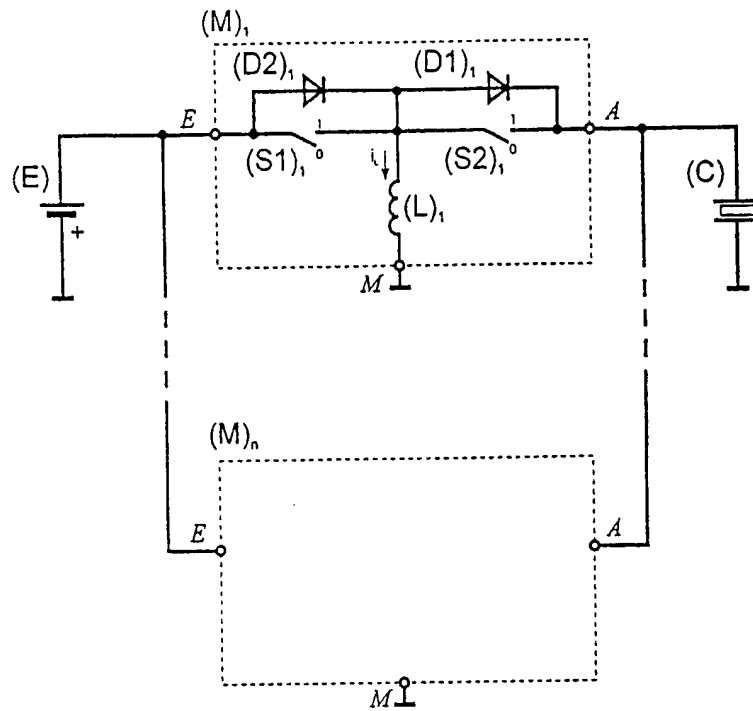


Fig. 1

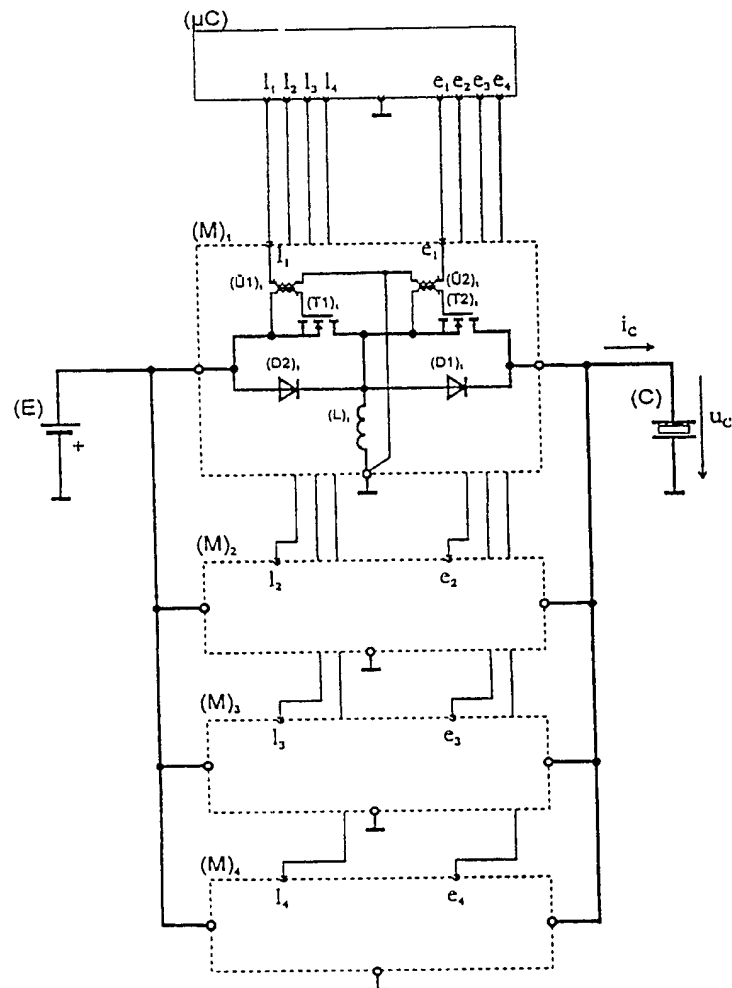


Fig. 2

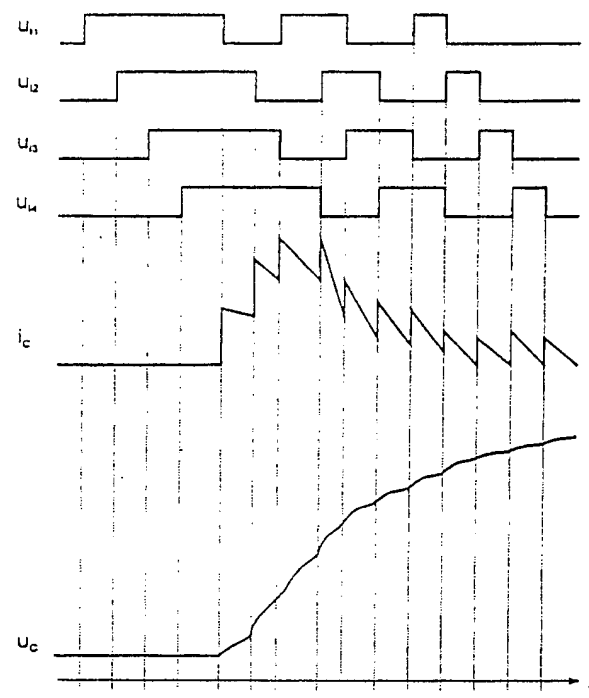


Fig. 3a

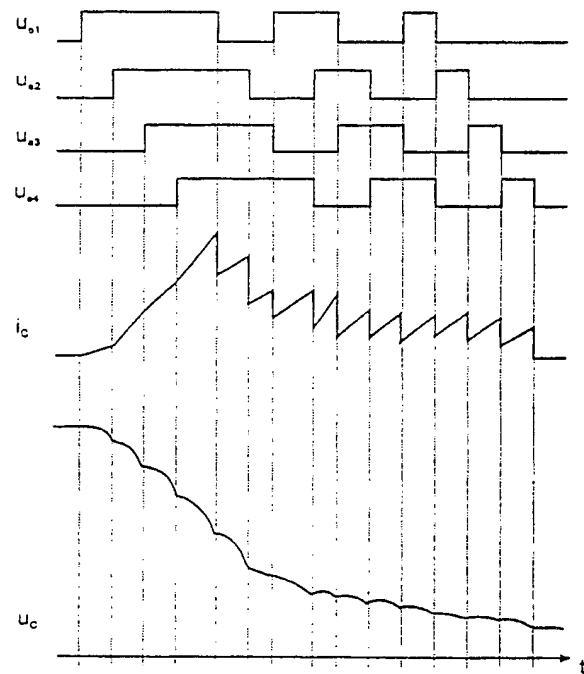


Fig. 3b